

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ГОРАЙ АНДРІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 631.171

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Підвищення ефективності використання теплових насосів для внутрішніх
потреб тваринницької ферми
(тема роботи)

208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело _____
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Сукманюк Олена Миколаївна
(прізвище, ім'я, по батькові)
к.і.н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Горай А.І. Підвищення ефективності використання теплових насосів для внутрішніх потреб тваринницької ферми. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Робота присвячена підвищенню ефективності охолодження молока і нагріву води, а також зниження енерговитрат за рахунок оптимізації й удосконалення конструктивно-технологічної схеми із застосуванням нових інноваційних енергозберігаючих технологій.

Теоретично обґрунтовано способи підвищення ефективності використання технологій охолодження молока. Наведено комбіновану математичну модель охолодження молока та нагріву води. Обґрунтовано вплив конструктивних параметрів і основних вузлів на ефективність роботи системи охолодження.

Ключові слова: тепловий насос, охолодження молока, нагрів води, ефективність.

ABSTRACT

Horai A. Improving the Efficiency of Heat Pumps for Internal Needs of Livestock Farms. Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agroengineering. - Polissia National University, Zhytomyr, 2021.

The work is devoted to increasing the efficiency of milk cooling and water heating, as well as reducing energy consumption by optimizing and improving the design and technological scheme with the use of new innovative energy-saving technologies.

Methods of increasing the efficiency of using milk cooling technologies are theoretically substantiated. The combined mathematical model of milk cooling and water heating is given. The influence of design parameters and main units on the efficiency of the cooling system is substantiated.

Key words: heat pump, milk cooling, water heating, efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІКИ Й ТЕХНОЛОГІЙ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА	6
1.1 Огляд техніки й технологій для охолодження молока	6
1.2. Аналіз перспективи розвитку техніки для охолодження молока	9
Висновки по розділу 1	12
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА	13
2.1 Вплив технології первинної обробки молока на його якість	13
2.2 Математична модель охолодження молока	13
2.3. Комбінована математична модель охолодження молока і нагрів води	18
2.4. Структурна модель установки охолодження молока і нагріву води	20
Висновки по розділу 1	22
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ	23
3.1. Основні технічні показники системи охолодження молока	23
3.2 Оптимізація режиму охолодження й нагрівання теплоносія	26
3.3. Оптимізація параметрів теплопередачі установки	29
3.4. Залежність умов теплообміну від часу й температури	32
3.5. Технічна реалізація установки охолодження молока і нагріву води	33
3.6. Керування системою охолодження молока і нагріву води	34
Висновки по розділу 3	36
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

Для забезпечення в повному обсязі процесу виробництва й переробки молока необхідно забезпечити безперебійну й ефективну роботу устаткування для первинної обробки, а саме, охолоджувачів молока, тому що цей процес тривалий й енергоємний.

На тваринницьких фермах агропромислового комплексу для охолодження молока, потрібне використання холодильних установок. Але також, є потреба й у гарячій воді, що використовується для технологічних цілей і напування тварин. Необхідно забезпечити й опалення окремих приміщень ферми, включаючи телятник у родильному відділенні. Всі ці операції можна виконувати при використанні устаткування й енергозберігаючих технологій.

У більшості випадків виробниками молочного устаткування для охолодження молока використовується так званий метод прямого або безпосереднього охолодження. Істотним недоліком цього способу є те, що швидкість руху молока вздовж холодної стінки близька до нуля, і тому час його охолодження з $+37^{\circ}\text{C}$ до $+5^{\circ}\text{C}$ градусів становить 3 години. Бактеріальне обсіменіння за цей час зростає в десятки й навіть сотні разів, що не дозволяє виконувати вимоги нових стандартів якості сирого молока.

У даний час часто на деяких фермах проводиться охолодження молока до 0°C , або повне заморожування молока й подальше його розморожування, що допустимо, тому що гинуть всі корисні мікроорганізми, які дозволяють використовувати молоко як сировину на переробних підприємствах, наприклад, виробництво живих йогуртів.

Мета дослідження – підвищення ефективності охолодження молока й зниження енерговитрат за рахунок оптимізації й удосконалення конструктивно-технологічної схеми охолодження молока й нагрівання води із застосуванням нових інноваційних енергозберігаючих технологій.

Об'єкт дослідження – процес охолодження молока, що проохолоджує комплекс, обладнаний тепловим насосом, охолоджувачами молока.

Завдання:

- розробити на основі аналізу існуючих схем охолодження молока й перспектив розвитку техніки енергозберігаючу, ефективну й економічно-доцільну технологію охолодження молока й нагрівання води;

- створити комбіновану енергоефективну установку охолодження молока й нагрівання води;

- оптимізувати технологічні параметри й температурні режими охолодження молока й нагрівання води.

Методика досліджень. Використано методи статистичного, математичного моделювання й аналізу, теоретичні основи теплотехніки в частині термодинамічного аналізу, основи теплопередачі, методи оптимізації для вирішення поставлених завдань.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано тези у Збірнику матеріалів науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2021» та збірнику матеріалів доповідей учасників V Міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи».

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 39 сторінках машинописного тексту, містить 3 таблиці, 19 рисунків, списку використаних джерел з 23 найменувань.

РОЗДІЛ 1.

СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІКИ Й ТЕХНОЛОГІЙ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА

Первинну обробку молока проводять із метою збереження його у свіжому виді в період зберігання, доставки споживачеві й на пункти переробки. Охолодження молока є основним процесом первинної обробки, що забезпечує стійкість молока при зберіганні [1].

Свіжовидоєне молоко протягом декількох годин має бактерицидні властивості. В даний період у ньому знаходяться речовини, що затримують розмноження бактерій. Зберегти бактерицидні властивості протягом більш тривалого часу – є основним завданням у боротьбі за якість молока. Коли молоко втрачає ці властивості, в ньому швидко розвиваються мікроорганізми, життєдіяльність яких призводить до скисання й псування продукту. Встановлено, що ці властивості зберігаються в активному стані в межах двох годин після видоювання й особливо в охолодженому молоці. Отже, проохолоджувати молоко необхідно відразу ж після видоювання.

1.1 Огляд техніки й технологій для охолодження молока

Можна виділити декілька технологічних схем для збору і охолодження молока:

- 1) охолодження й зберігання в резервуарах-охолоджувачах;
- 2) попереднє охолодження в пластинчастому охолоджувачі, доохолодження в резервуарі-охолоджувачі, зберігання в резервуарі-термосі [2].

Охолодження в резервуарах-термосах може бути безпосереднім і непрямим. При безпосередньому охолодженні холодоагент холодильної машини відбирає тепло від молока, при непрямому – від проміжного холодоносія.

Технологічна схема первинної обробки молока й комплект устаткування для її реалізації залежать від способу доїння й типу доїльних установок, розміру й планування ферм, способу й кратності реалізації молока протягом доби, далекості ферм від молочних заводів та ін. При доїнні корів у молокопровід первинна обробка молока здійснюється у потоці в процесі доїння. При доїнні корів у відра первинну обробку молока роблять після закінчення доїння. Основне призначення будь-якої технологічної лінії первинної обробки – одержання цільного (натурального) і питного молока. Технологічна лінія одержання незбираного молока передбачає виконання

наступних операцій: доїння – облік – очищення – охолодження – зберігання – відправлення (див. рис.1.1.)[3].

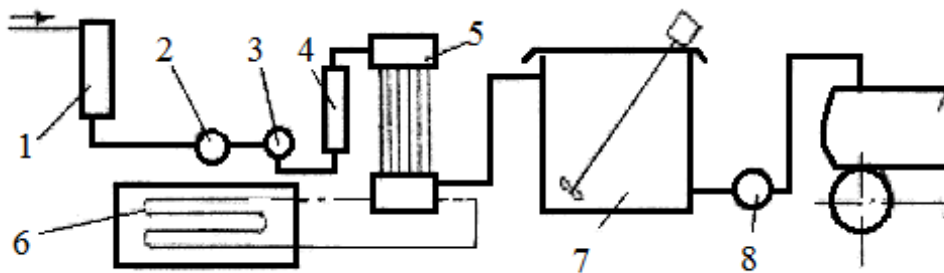


Рисунок 1.1 – Схема первинної обробки незбираного молока: 1 – молокоприймач-повітроохолоджувач; 2 – лічильник молока; 3 – молочний насос; 4 – фільтр; 5 – пластинчастий охолоджувач; 6 – холодильна установка; 7 – ванна для зберігання молока; 8 – цистерна для перевезення молока

У молочні застосовують різні прилади й апарати, оснащені холодильними установками. В них заготовляють лід з розрахунку 1 м³ льоду на 1 тону молока (в цю норму входять і втрати льоду при зберіганні). Для охолодження молока використовується й вода, але ці методи вважаються старими й примітивними. Один зі способів збереження молока свіжим – це використання холодильників. Молоко спочатку заморозують, як і воду, коли готують лід, в комірках морозильної шафи. Потім брикети замороженого молока опускають у парне молоко, яке призначене для зберігання.

У більшості для охолодження молока використовують молочні танки. Холодильний танк овальної форми серії DXSE і DXSEM компанії ДеЛеваль має дно з великою поверхнею охолодження, що дозволяє встановити компресори з високою холодопродуктивністю (рис. 1.2).



Рисунок 1.2. Холодильна машина при безпосередньому охолодженні молока

При зниженні температури молоко стає чутливим до механічного впливу, тому лопасті мішалки устаткування працюють на мінімальних

оборотах. Спеціально сконструйовані лопасті мішалки мінімізують попадання повітря в молоко, що запобігає утворенню в молоці вільних жирних кислот.

Охолодження в резервуарах-охолоджувачах може бути безпосереднім і непрямим. При безпосереднім охолодженні холодоагент холодильної машини відбирає тепло від молока, при непрямому охолодженні - від проміжного холодоносія (рис. 1.3).



Рисунок 1.3. Схема охолодження молока з непрямим охолодженням

Кожна система має свої переваги, але завдяки простоті обслуговування найбільш поширені системи з безпосереднім охолодженням. Оскільки енергозберігаючим технологіям надається в наш час все більше значення, тому проводять розробки резервуарів охолоджувачів молока з рекуператором тепла [4].

Варіанти виконання охолоджувачів молока:

- компактний (холодильний агрегат, який кріпиться до ємкості на рамі);
- роздільний (монтаж холодильного агрегату проводиться в зручному для користувача місці).

- кількість мішалок: від 1 до 3, залежно від типу охолоджувача молока.

- перемішування: низько швидкісне (25 об/хв), що дозволяє уникнути спінювання молока. На початку охолодження (до $t=+20^{\circ}$) перемішування немає, потім періодичне, щоб уникнути примерзання молока до стінок ємкості.

- кожна ємкість калібрується індивідуально. Звіряючи показання мірної лінійки й індивідуальної таблиці, можна точно визначити об'єм молока, що перебуває в охолоджувачі.

- оптимальна програма промивання без тіньових зон.

- опція: пристрій рекуперації тепла: вбудований теплообмінник дозволяє одержати 50 літрів води з $t=50$ °C при охолодженні кожних 100 літрів молока.

В умовах вітчизняного виробництва, господарства, що розташовані поблизу молокозбірних пунктів чи маслозаводів, застосовують на молочно-товарних фермах найбільш просту схему обробки молока: очищення - охолодження. Дану схему застосовують при виробництві молока, яке отримують від тварин, що перебувають під постійним ветеринарним наглядом, та в умовах високих санітарних вимог [5, 6].

При відправленні молока безпосередньо в торговельну мережу для продажу в розлив або доставку на підприємства громадського харчування користуються схемою: очищення - пастеризація - охолодження.

Великі молочнотоварні комплекси-ферми приміських господарств, що поставляють молоко безпосередньо в торговельну мережу, застосовують схему: очищення - пастеризація - охолодження - розфасовка в дрібну тару. Ряд господарств, розташованих у зоні діяльності маслоробних підприємств, сепарують молоко, прохолоджують вершки й здають на маслозаводи.

У віддалених господарствах, застосовують технології, пов'язані з переробкою молока, наприклад, а) очищення - пастеризація - сепарування з одержанням високожирних вершків - механічна обробка вершків з їхнім охолодженням - одержання вершкового масла; б) очищення - пастеризація - сепарування з одержанням вершків середньої жирності - дозрівання вершків - збивання й одержання масла [7]. На деяких фермах і комплексах організують виробництво молочнокислих продуктів, кефіру, сирів та ін.

1.2. Аналіз перспективи розвитку техніки для охолодження молока

У теперішній час енергозберігаючими технологіям надається все більше значення, тому що зараз вартість електроенергії з кожним роком буде збільшуватися, тому актуальність енергозбереження при охолодженні молока буде зростати.

На підставі аналізу обладнання для охолодження молока встановлено, що необхідно застосовувати економічні види устаткування, одним із яких є теплові насоси.

На тваринницьких фермах для охолодження молока, потрібно часто використовувати холодильні установки. Також на підприємствах харчової промисловості для реалізації технологічних процесів потрібно застосовувати холодильні машини. З іншого боку, протягом усього року існує більша потреба в гарячій воді, застосовуваної для різних видів очищення. Необхідно

забезпечити також й опалення приміщень, наприклад телятника в родильному відділенні.

Велика потреба й у гарячій воді, що використовується для очищення, промивання устаткування. Всі ці операції можна виконувати при використанні теплових насосів.

Застосування нового технологічного обладнання дозволяє поряд з економією початкових витрат (20-30%) переходити на інші режими роботи. Окупність переозброєння об'єктів у теплоенергетиці коливається від 2 до 5 років, а в деяких випадках становить усього кілька місяців [8].

Основним недоліком при використанні всіх вищевказаних схем й обладнання для охолодження молока є те, що вони проводять охолодження молока практично до 0-1 °С, що недопустимо, тому що знищується вся корисна мікрофлора, яка на переробних підприємствах не відновлюється й молоко стає непридатним для виробництва кисломолочних продуктів. Тому, нашою метою є розробити таку технологію охолодження молока, що була б не згубною для корисних мікроорганізмів молока й енергозберігаючою. У результаті чого виникла можливість застосування теплових насосів для охолодження молока.

Основною перевагою теплового насоса:

1. Економічність:

- низьке енергоспоживання досягається за рахунок високого коефіцієнта перетворення енергії теплового насоса (від 300% до 700%) і дозволяє одержати на 1 кВт витраченої електричної енергії 3-7 кВт теплової енергії;

- система винятково довговічна, термін експлуатації ґрунтового зонда досягає 100-150 р.;

- безпосередньо в самій установці єдиною рушійною частиною є компресор, термін служби якого становить орієнтовно 20 років, і який можна легко й дешево замінити після закінчення його експлуатації;

- зникає необхідність у закупівлі та зберіганні палива й витрат коштів, пов'язаних із цим;

- звільнення значної території, необхідної для розміщення котельні, під'їзних колій і складу з паливом.

- термін окупності обладнання не перевищує 6-и опалювальних сезонів.

2. Тепловий насос працює стабільно:

- коливання температури й вологості в приміщенні мінімальні;

- не вимагає спеціальної вентиляції приміщень, де відбувається нагрівання води й теплоносія;

- відсутній шум;

- абсолютно вибухо- і пожежобезпечний;

- у процесі експлуатації система не має потреби в спеціальному обслуговуванні, можливі маніпуляції не вимагають спеціальних навичок й описані в інструкції;

- систему можна діагностувати й вносити коректування на відстані, для цього необхідно мати лінію Інтернет.

3. Екологічність:

- екологічно чистий метод, тому що не виробляється емісія CO₂, NO_x й інших викидів, що приводять до порушення озонового шару й кислотних дощів;

- відсутні алергенів та небезпечних викидів в приміщення, тому що немає спалювального палива і не використовуються заборонені холодоагенти.

У випарнику теплового насоса прохолоджується вода джерела, а відібрана тепла енергія не викидається безпосередньо в атмосферу, а гріє в конденсаторі воду із системи гарячого водопостачання.

Джерелом для роботи теплового насоса може будь-яка проточна вода з температурою від +5°C до +40°C. Найчастіше як джерело тепла використовують артезіанські свердловини, нагріті промислові викиди, градирні, незамерзаючі водойми. У тепловому насосі є три основних агрегати (випарник, конденсатор, компресор) і три контури (холодновий, водяний джерела й водяний опалення).

Випарник – теплообмінник, де в трубках рухається вода джерела, а між трубок – холодоагент (хладон). Нехай через випарник проходить +8°C...+10°C вода (наприклад, зі свердловини). Шляхом регулювання дроселем наструюється такий тиск хладона у випарнику, щоб температура його кипіння склала 2-3 °C (всі хладони мають круту залежність температури кипіння від тиску).

Тепер при тепловому контакті з "гарячими" трубками частина холодоагенту скипає, "відбираючи" при цьому енергію у води. Охолоджена вода, що пройшла через випарник, скидається в іншу (приймальну) свердловину. Випаруваний хладон, у свою чергу, всмоктується в компресор, стискається ним, і, нагрітий, виштовхується в конденсатор.

Конденсатор за пристроєм – такий як теплообмінний апарат і випарник. Потрапляючи в міжтрубний простір з температурою +70...+80°C і вступаючи в теплообмін зі зворотною водою із системи опалення (+50°C ...+55°C), хладон конденсується на "холодних" трубках, передаючи свою енергію воді. Вода в трубках нагрівається, а холодоагент, уже рідкий, стікає на дно конденсатора, звідки, за рахунок перепаду тисків, через дросель повертається у випарник. Так спрощено виглядає робочий цикл теплового насоса [9-11].

Тепловий насос може використовувати різні джерела низькопотенціального тепла, віддаючи його в конденсаторі при підвищеній температурі потоку газу, рідині або тепловому акумулятору, рідкому або твердому. У більшості випадків використовується водяна система, у якій циркулює гаряча вода.

Оскільки ефективність теплового насоса сильно залежить від температури конденсації, для теплових насосів бажане зниження температури розподілу тепла. Очевидно, що при збільшенні поверхні теплообміну стане придатною температура $+50^{\circ}\text{C}$.

Отже можна зробити висновок, що:

- застосування теплового насоса доцільно для гарячого водопостачання (або як побічний ефект опалювальної функції, або як основна функція).

- застосування теплового насоса доцільно для охолодження технологічного обладнання підприємств.

- до окремої функції теплових насосів можна віднести функцію регенерації тепла. Прилад може забирати тепло повітря із приміщень де знаходяться тварини, промислових приміщень, від холодильних установок, а також тепло стічних вод і використати його в корисних цілях.

Висновки по розділу 1

Перспективним є економічне і енергозберігаюче обладнання з тепловими насосами, що мають переваги: економічність – для передачі в систему нагрівання – охолодження 1 кВт теплової енергії установки необхідно затратити всього 0,2-0,35 кВт електроенергії.

Застосування теплових насосів в установках ефективно не тільки в енергетичній складовій, але й у технологічній, дозволяючи здійснити дві технологічні операції: охолодження молока і нагрівання води з коефіцієнтами перетворення тепла 4...7 і холоду 2...4.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА

2.1 Вплив технології первинної обробки молока на його якість

Всім відомо, що якість сирого молока визначає і якість молочних продуктів. Якість молока в Україні оцінюється ДСТУ [12]. Відповідно до ДСТУ молоко залежить від органолептичних, мікробіологічних та інших показників та поділяється на сорти.

Чим вищі показники якості молока, тим вища його закупівельна ціна, та рентабельність молочного виробництва. Все це змушує виробників молока постійно підвищувати його якість.

Основним способом підвищення якості молока - провести його первинну обробку: очищення й охолодження.

При охолодженні молока більшість бактерій, особливо молочнокислі, припиняють свій розвиток, а при температурі 3-4 °С вони повністю припиняють розмножуватися. У свіжовидоєному молоці утримуються бактерицидні речовини – імунні тіла, що перешкоджають бактеріям. Неохоложене молоко після доїння губить свої бактерицидні властивості. Основним показником, за яким визначають його свіжість є кислотність. Парне молоко має кислотність 16-18° Т. Кислотність, так само як і бактерицидні властивості молока сильно залежить від температури охолодження й зберігання молока [13, 14].

З вищенаведеного потрібно зробити висновок, що для збереження якості молока необхідно його охолодити якнайшвидше.

2.2 Математична модель охолодження молока

В основу розрахунку охолодження молока за допомогою пластинчастого охолоджувача покладена математична модель із обліком змінних умов функціонування.

Запропонована структурна математична модель технологічного процесу охолодження молока, яка показана на рис. 2.1.

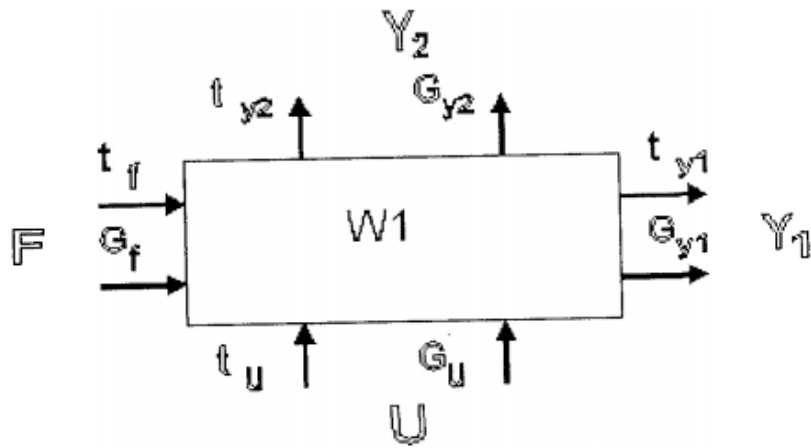


Рисунок 2.1 – Структурна схема математичної моделі технологічного процесу охолодження молока

Ця модель представляє установку охолодження молока у вигляді динамічної системи, що здійснює перетворення вхідних збурюючих і керуючих дією у вихідні змінні параметри.

Де: $F = \{t_r; G_r\}$ – вихідний вектор умов охолодження молока;

t_r – температура молока на вході в теплообмінник, °С;

G_r – витрата молока на вході у теплообмінник, кг/год.

$U = \{t_u; G_u\}$ – вхідний вектор управлінням охолодженням молока;

t_u – температура води на вході в теплообмінник (тепловий насос), °С;

G_u – витрата води на хвої в теплообмінник (тепловий насос) кг/год;

$Y_1 = \{t_{y1}; G_{y1}\}$ – вихідний вектор охолодження молока;

t_{y1} – температура охолодженого молока, °С;

G_{y1} – витрата охолодженого молока, кг/год;

$Y_2 = \{t_{y2}; G_{y2}\}$ – вихідний вектор охолодженої води;

t_{y2} – температура води на вході із теплообмінника, °С;

G_{y2} – витрата води на вихід із теплообмінника, кг/год.

Вихідні вектори Y_1 і Y_2 залежать від вхідних векторів F і U .

Цей зв'язок може бути виражений оператором W . Побудова структурної схеми математичної моделі і її технологічного процесу закладається в установленні виду і структури оператора, що описує залежність вихідних параметрів від вхідних:

$$Y = W[F, U].$$

При охолодженні молока за допомогою теплообмінника отримуємо наступний вираз:

$$Y_1 = W_1[t_f, G_f, t_u, G_u]; Y_2 = W_2[t_f, G_f, t_u, G_u]$$

Розглянемо функціональну схему математичної моделі охолодження молока, що показана на рис. 2.2.

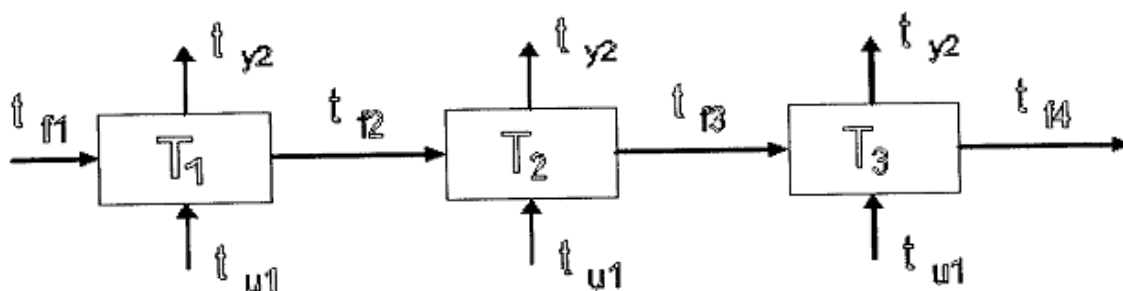


Рисунок 2.2 – Функціональна схема математичної моделі охолодження молока: Т – теплообмінник

Для охолодження молока використовуються три секції теплообмінника на стадії охолодження молока із артезіанської свердловини з температурою 8°C.

Тепловий потік, що відбирається водою від молока, визначається за формулою 2.1 [15]:

$$Q = G_f C_f (t_f - t_{y1}), \quad (2.1)$$

де G_f – подача молока, кг/год;

C_f – теплоємність молока, кДж/(кг·°C);

t_f і t_{y1} – початкова і кінцева температура молока, відповідно, °C.

Якщо знехтувати втратами тепла в навколишнє середовище, то ця кількість теплоти набуває вода:

$$Q = G_u C_u (t_{y2} - t_u), \quad (2.2)$$

де G_u – подача холодоагенту, кг/год;

C_u – його теплоємність, кДж/(кг·K);

t_{y2} і t_u – кінцева і початкова температура холодоагенту, відповідно, °C.

Процес охолодження в пластинчатих охолоджувачах іде безперервно, тобто подача молока і холодоагенту здійснюється безперервно. Але в залежності від температурного режиму охолоджувальної рідини потрібно більше, ніж холодоагенту. Відношенні витрати холодоагенту до витрат охолодження рідини називають коефіцієнтом кратності витрат холодоагенту [16]:

$$K_k = \frac{G_u}{G_f} \quad (2.3)$$

або

$$G_u = K_k \cdot G_f \quad (2.4)$$

Підставивши (2.3) в рівняння (2.2) і порівнявши (2.1) і (2.2), можна визначити коефіцієнт кратності:

$$K_k = \frac{G_u(t_f - t_{y1})}{G_f(t_{y2} - t_u)}, \quad (2.5)$$

Якщо охолоджувач двохсекційний (водяний і ропний), тоді загальний потік тепла від молока до холодоагентам

$$Q = Q_B + Q_p,$$

де Q_B – потік тепла, отриманого водою, Вт;

Q_p – потік тепла, отриманий ропним потоком, Вт.

Ці потоки визначаються аналогічно залежності (2.2).

Потік тепла, що проходить через стіни охолоджувача, можна виразити рівнянням Ньютона

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau, \text{ Вт} \quad (2.6)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі через плоску стінку, Вт/м²·К;

F – загальна теплообмінна поверхня, м²;

Δt_{cp} – середній градієнт температур між теплообмінними середовищами, °С;

τ – тривалість охолодження молока в охолоджувачі, с.

Прирівнявши (2.1) і (2.6), можна визначити загальну теплообмінну поверхню.

$$F = \frac{G_f C_f (t_f - t_{y1})}{k \Delta t_{cp}}, \text{ м}^2 \quad (2.7)$$

Середній градієнт температур або температурний напір визначається як середнє логарифмічне

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}}, \quad (2.8)$$

де Δt_{max} і Δt_{min} – максимальний і мінімальний температурний напір між теплообмінними рідинами, звичайно як для прямо потоку, так і для протитоку максимальний температурний напір спостерігається на початку охолодження молока, а мінімальний – в кінці.

Якщо $\Delta t_{max}/\Delta t_{min} < 2$, тоді середній температурний напір можна визначити як середнє арифметичне з погрішністю в більшу сторону, не перевищуючи 3%.

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{max} + \Delta t_{min}}{2}, \quad (2.9)$$

Коефіцієнт теплопередачі залежить від багатьох факторів (температури теплообмінних рідин, конструкції теплообмінника, умов течії рідин тощо). І в кожному конкретному випадку визначається експериментально. Є ряд експериментальних залежностей для його визначення. Орієнтовано можна прийняти, що при передачі від рідини до рідини $k \approx 1000 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К} = 4,18$

МДж/м²·год·К [15, 16]. Число робочих пластин в секції (теплообмінних поверхонь):

$$z_{\text{пл}} = \frac{F}{f_{\text{пл}}} \quad (2.10)$$

де $f_{\text{пл}}$ – площа робочої поверхні однієї пластини.

Щоб молоко встигло охолодитись до заданої температури, воно повинно заходитись в охолоджувачі визначений час τ . За цей час воно віддає кількість тепла, що визначається за формулою 2.6 Ньютона.

Цю ж кількість тепла можна представити як необхідне для охолодження молока, що знаходиться одночасно в охолоджувачі (кількість каналів для молока $z_{\text{пл}}/2$)

$$Q = f_{\text{пл}} \Delta l \frac{z_{\text{пл}}}{2} \rho_f C_f (t_f - t_{y1}), \text{ Дж} \quad (2.11)$$

де Δl – товщина зазору, по якому протікає молоко в охолоджувачі;

$f_{\text{пл}}$ – робоча площа пластини;

$$f_{\text{пл}} = b \times h,$$

де b – ширина пластини;

h – висота пластини.

Прирівнявши формули (2.6) і (2.11), визначаємо час знаходження молока в охолоджувачі:

$$\tau = \frac{f_{\text{пл}} \Delta l z_{\text{пл}} \rho_f C_f (t_f - t_{y1})}{2 \cdot k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (2.12)$$

Термін знаходження молока в охолоджувачі повинен бути не більше 2 год. (ДСТУ 3662-97 "Молоко коров'яче незбиране"). Цей же термін можна визначити по швидкості руху молока в охолоджувачі v_m .

$$\tau = \frac{h}{v_m}, \quad (2.13)$$

Прирівнявши (2.13) і (2.12), визначимо швидкість руху молока в охолоджувачі.

$$v_m = \frac{2 \cdot k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}}{f_{\text{пл}} \Delta l z_{\text{пл}} \rho_m C_m (t_{\text{нм}} - t_{\text{км}})}, \quad (2.14)$$

Продуктивність охолоджувача

$$П = \vartheta_1 b \Delta l C_f \frac{z_{\text{пл}}}{2} = \frac{2 \cdot k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \Delta l C_f z_{\text{пл}}}{2 f_{\text{пл}} \Delta l z_{\text{пл}} C_f G_f (t_f - t_{y1})} = \frac{k \cdot F \cdot h \cdot \Delta t_{cp}}{C_f (t_f - t_{y1})}, \quad (2.15)$$

оскільки $b \cdot h = f_{\text{пл}}$.

Користуючись приведеними формулами (2.1), (2.7), (2.10), (2.14), по заданій продуктивності можна визначити параметри охолоджувача: площу поверхні теплообмінника, кількість теплообмінних пластин, термін знаходження молока в охолоджувачі.

2.3. Комбінована математична модель охолодження молока і нагрів води

В основу розрахунку охолодження молока і нагріву води з допомогою теплового насоса покладена математична модель з врахуванням перемінних умов функціонування насоса.

Пропонується комбінована схема моделювання установки охолодження молока і нагріву води, що показана на рис. 2.4.

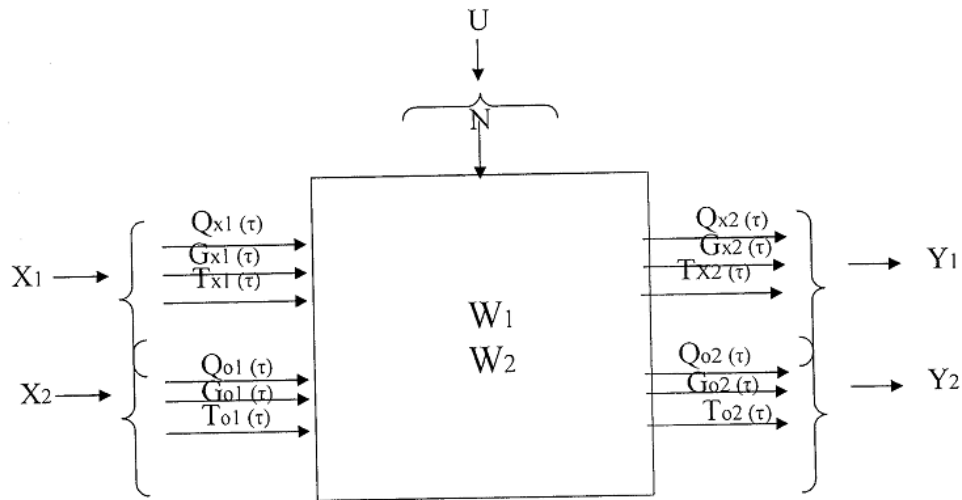


Рисунок 2.4 – Структурна схема математичної моделі технологічного процесу охолодження молока і нагріву води

Ця схема представляє установку охолодження молока і нагріву води у вигляді динамічної системи, що здійснює перетворення вхідних збурюючих і керуючих дій у вихідні перемінні параметри.

Де: Вхідний вектор $X1$ і вихідний вектор $Y1$ відносяться до низько потенціального джерела енергії (грунтової води):

$$X1 = \{Q_{X1}(\tau); G_{X1}(\tau); T_{X1}(\tau)\} \quad (2.16)$$

$$Y1 = \{Q_{X2}(\tau); G_{X2}(\tau); T_{X2}(\tau)\} \quad (2.17)$$

$Q_{X1}(\tau)$ – холодопродуктивність теплового насоса (кількість тепла, що відбирається у низько потенціального джерела енергії – грунтової води за одиницю часу), кВт;

$G_{X1}(\tau)$ – витрата холодної (грунтової) води на вході в насос, кг/год;

$T_{X1}(\tau)$ – температура холодної води на вході в насос, К;

$Q_{X2}(\tau)$ – кількість тепла, що залишилося у грунтовій воді, кВт;

$G_{X2}(\tau)$ – витрата холодної (грунтової) води на виході із насоса, кг/год;

$T_{X2}(\tau)$ – температура холодної води на виході із насоса, К.

Вхідний вектор $X2$ і вихідний вектор $Y2$ відносяться до нагрітої тепловим насосом води:

$$X2 = \{Q_{O1}(\tau); G_{O1}(\tau); T_{O1}(\tau)\} \quad (2.18)$$

$$Y2 = \{Q_{02}(\tau); G_{02}(\tau); T_{02}(\tau)\} \quad (2.19)$$

$Q_{01}(\tau)$ – кількість тепла, що надходить для нагрівання водою на вході в насос, кВт;

$G_{01}(\tau)$ – витрата нагріваємої води на вході в насос, кг/год;

$T_{01}(\tau)$ – температура нагріваємої води на вході в насос, К;

$Q_{02}(\tau)$ – теплопродуктивність насосу (кількість тепла, що передається за одиницю часу нагрітою водою), кВт;

$G_{02}(\tau)$ – витрата нагріваємої води на вході із насосу, кг/год;

$T_{02}(\tau)$ – температура нагріваємої води на вході із насосу, К;

Вхідний керуючий вектор U є потужністю компресора N , кВт.

Вихідні вектори $Y1$ і $Y2$ залежать від вхідних векторів F_1 і F_2 . Цей зв'язок може бути виражений оператором W . Побудова математичної моделі і її технологічного процесу заключається в установленні виду і структури оператора, що описує залежність вихідних параметрів від вхідних:

$$Y = W[X1, X2]$$

При охолодженні молока і нагріву води за допомогою теплового насосу отримуємо наступні вирази:

$$Y_1 = W_1[X1, X2];$$

$$Y_2 = W_2[X1, X2]$$

$$Y1 = \{Q_{X2}(\tau); G_{X2}(\tau); T_{X2}(\tau)\}$$

$$Y2 = \{Q_{02}(\tau); G_{02}(\tau); T_{02}(\tau)\}$$

Вхідний керуючий вектор U є потужністю компресора N , кВт.

Головною задачею моделювання є отримання математичних залежностей для визначення холодопродуктивності $Q_{X1}(t)$ і теплопродуктивності $Q_{02}(t)$ теплового насоса:

$$Q_{X1}(t) = W_1[N; G_{X1}(t); T_{X1}(t)]$$

$$Q_{02}(t) = W_2[N; G_{01}(t); T_{01}(t); T_{02}(t)T_{X1}(t)]$$

Розглянемо функціональну модель охолодження молока і нагріву води за допомогою теплового насосу, що показана на рис. 2.5.

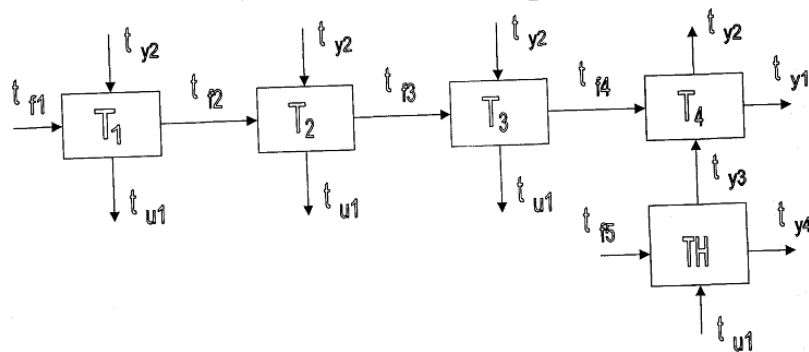


Рисунок 2.5 – Функціональна схема математичної моделі системи охолодження молока і нагріву води

Основними розрахунками рівняння теплообміну є рівняння теплопередачі і рівняння теплового балансу (див. 2.1 і 2.2).

Визначним фактором роботи теплового насоса є керуючий вектор – потужність компресора N . Тому необхідно також встановити залежність потужності компресора від всіх інших характеристик роботи теплового насоса [17]:

$$N = W_3[q_1(t) \cdot q_2(t) \cdot G(t)], N = q_1 - q_2 \quad (2.20)$$

Коефіцієнт перетворення тепла:

$$K_T = \frac{q_1}{N} \quad (2.21)$$

Коефіцієнт перетворення холоду:

$$K_X = \frac{q_2}{N} \quad (2.22)$$

Отримаємо наступні формули для коефіцієнтів перетворення:

$$K_T = \frac{G1C1(t1-t1)}{G1C1(t1-t1)-G2C2(t2-t2)} \quad (2.23)$$

$$K_X = \frac{G2C2(t2-t2)}{G1C1(t1-t1)-G2C2(t2-t2)} \quad (2.24)$$

2.4. Структурна модель установки охолодження молока і нагріву води

Розглянемо схему охолодження молока і нагріву води (рис. 2.6):

1. Визначимо масову (V_{mM}) і об'ємну (V_{mv}) швидкість охолодження молока

$$V_{mM} = \frac{m_M}{t}, \text{ кг/с} \quad (2.25)$$

де m_M – маса молока, що надходить на охолодження, кг;

t – час охолодження, с.

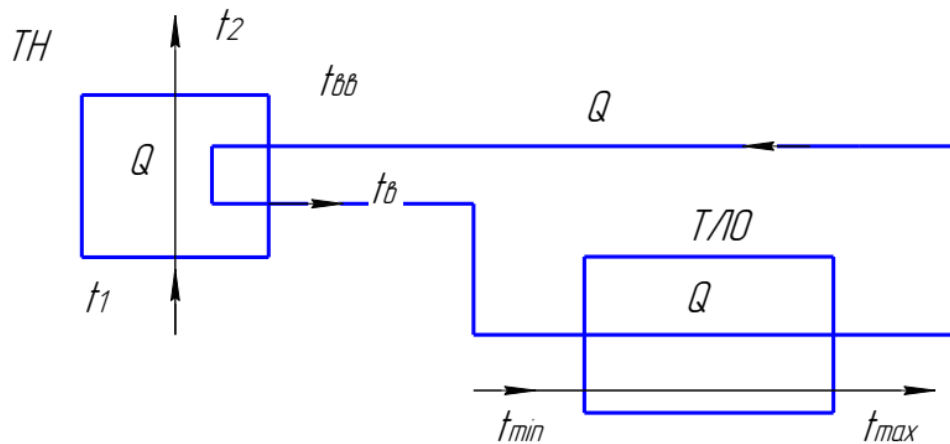


Рисунок 2.6 – Схема охолодження молока і нагріву води

$$V_{mv} = \frac{m_M}{\rho_M t}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.26)$$

де ρ_M – густина молока, кг/м³.

Визначимо швидкість руху молока:

$$v_{ML} = \frac{m_M}{\rho_M t S_M}, \text{ м/с} \quad (2.27)$$

де S_M – перетин каналу для молока, м^2 .

2. Визначимо ті ж параметри для води.

Масова швидкість нагріву води - $V_B = \frac{m_B}{t}$, кг/с

де m_B – маса води, необхідна для охолодження молока, кг .

Об'ємна швидкість охолодження води - $V_{BV} = \frac{m_B}{\rho_B t}$, $\text{м}^3/\text{с}$.

де ρ_B – густина води, кг/м^3 .

Швидкість руху води - $v_{ВЛ} = \frac{m_B}{\rho_B t S_B}$, м/с ,

де S_B – перетин каналу для води, м^2 .

3. Визначимо кількість теплоти:

Теплота, яку віддає молоко:

$$Q_m = C_m \cdot m_m (t_{mП} - t_{mК}), \text{ Дж} \quad (2.28)$$

де C_m – теплоємність молока, $\text{кДж/кг} \cdot \text{К}$;

$t_{mП}$, $t_{mК}$ – відповідно температура кінцева і початкова молока, $^{\circ}\text{C}$;

Теплота, яку отримує вода.

$$Q_B = C_B \cdot m_B (t_{ВП} - t_{ВК}), \text{ Дж} \quad (2.29)$$

де C_B – теплоємність води, $\text{кДж/кг} \cdot \text{К}$;

$t_{ВК}$, $t_{ВП}$ – відповідно температура кінцева і початкова води, $^{\circ}\text{C}$.

Кількість води, яка необхідна для охолодження молока:

$$m_B = \frac{C_m \cdot m_m (t_{mП} - t_{mК})}{C_B \cdot (t_{ВП} - t_{ВК})}, \text{ кг} \quad (2.30)$$

4. Передаточна характеристика системи (рис. 2.7):

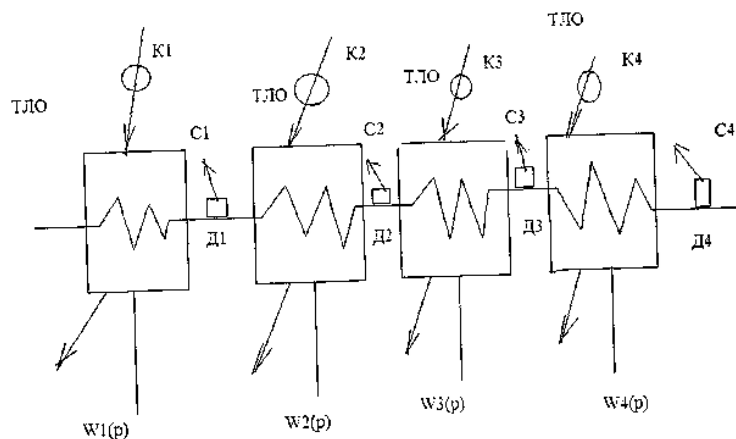


Рисунок 2.7 – Передаточна характеристика системи: Д1, Д2, Д3, Д4 – датчики температури, що реагують на температуру вихідного молока. Якщо температура вища, вони відкривають клапани К1, К2, К3 і К4 та збільшують надходження холодної води і навпаки

Передаточна характеристика має вигляд:

$$W(p) = \frac{W1(p)}{1+W11(p)W1(p)} \times \frac{W2(p)}{1+W22(p)W2(p)} \times \frac{W3(p)}{1+W33(p)W3(p)} \times \frac{W4(p)}{1+W44(p)W4(p)} \quad (2.31)$$

Нехай:

C1(W11), C2 (W22), C3(W33), C4(W44) – зворотній зв'язок.

Тоді:

$$C1 = W11 = \frac{Y1}{t} = K1; \quad C2 = W22 = \frac{Y2}{t2} = K2; \quad C3 = W33 = \frac{Y3}{t3} = K3;$$

$$C4 = W44 = \frac{Y4}{t4} = K4$$

де K – коефіцієнт пропорційності;

t – температура вихідної води, °C;

Y – дія сигналу на клапан (залежить від температури вихідної води).

5. Тоді $W1(p) = \frac{K1}{T1p+1}$, $W3(p) = \frac{K3}{T3p+1}$, $Y = K \left(1 - \frac{1}{eT}\right)$, $X=f(t)$.

6. Перевіримо функцію на стійкість:

$$W(j\omega) = W(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} = \frac{K}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} e^{-j\arctg T\omega}$$

$$W(\omega) = \frac{K}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg T\omega, \quad W(j\omega) = \frac{K}{T_1(j\omega)+1} \quad X = ae^{j\omega t}$$

$$px = \frac{dx}{dt} = j\omega ae^{j\omega t} = j\omega t$$

$W(j\omega) = R(\omega) + jY(\omega) = W(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ – функція в уявних числах,

де ω – кутова частота, c^{-1} ;

T – постійна часу, c;

R – дійсна складова функції;

j – уявна складова функції.

$$W(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + j^2(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \left(\arctg \frac{Y(\omega)}{R(\omega)}\right),$$

$$R(\omega) = \frac{K}{1+T^2\omega^2} \quad Y(\omega) = -j \frac{KT\omega}{1+T^2\omega^2}, \quad W(j\omega) = K \text{ при } \omega = 0,$$

$$W(j\omega) = 0 \text{ при } \omega = \infty.$$

Система в цілому, є стійкою і керованою в заданих межах параметрів за критерієм Найквіста.

Висновки по розділу 2

1. Розроблена структурна схема математичної моделі охолодження молока, рис. 2.1.
2. Розроблена комбінована структурна схема математичної моделі охолодження молока і нагріву води, рис. 2.4.
3. Запропонована розрахункова модель енергоефективності установки охолодження молока і нагріву води.

РОЗДІЛ 3.
УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ
ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

3.1 Основні технічні показники системи охолодження молока

Технологічна схема представлена на рис. 3.1. Вода, що забирається з артезіанської свердловини з температурою 8°C [18], надходить на тепловий насос для охолодження до температури 2...4°C [19], щоб потім потрапити в охолоджувач для охолодження молока до зазначеної температури. Вода, виходячи з охолоджувача, надходить у тепловий насос, де догрівається до температури 45...50°C.

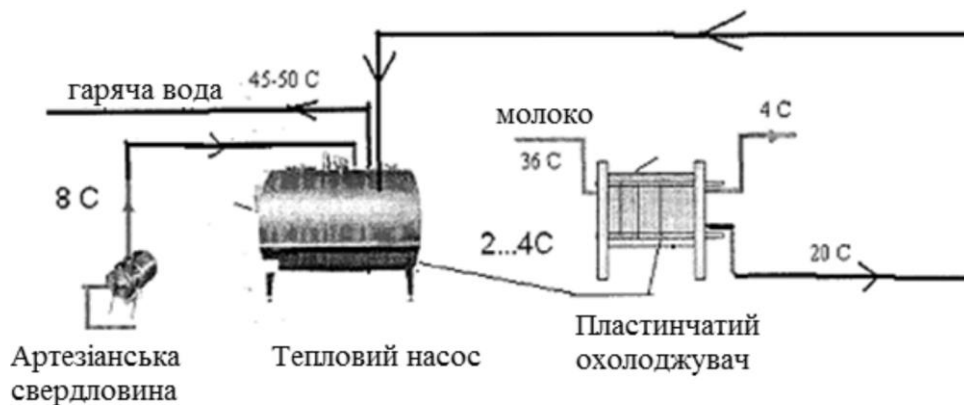


Рисунок 3.1 – Схема застосування теплового насоса

Пластинчасті теплообмінники здійснюють передачу тепла через тонкі (0,4-0,7 мм) гофровані пластини з нержавіючої сталі або інших спеціальних сплавів [20].

Пластинчасті теплообмінники призначені для здійснення процесів теплопередачі між різними робочими середовищами – рідина-рідина, пара-рідина, пара+газ-рідина, газ-газ, у технологічних лініях, а також у системах теплопостачання і гарячого водопостачання, замість швидкісних вододіючих і паро-водіючих підігрівачів.

Пластинчасті теплообмінники застосовуються також у системах гарячого водопостачання (ГВП), кондиціонування. Широке поширення ТР знайшли в харчовій промисловості (пастеризатори або охолоджувачі молока, вина, пива та ін.).

Пластинчасті теплообмінники мають суттєві переваги перед іншими теплообмінниками. По-перше, вони мають низькі тепловтрати. По-друге,

мають низькі втрати тиску. По-третє, низькі витрати при виробництві монтажних-налагоджувальних, ізоляційних і ремонтних робіт. А також існує можливість розбирання теплообмінника при очищенні, є можливість збільшені потужності додаванням пластин.

Пластинчастий теплообмінник завдяки своїй простоті при монтажі може встановлюватися прямо на підлогу в тепловому пункті або на несучу конструкцію блокового теплових пункту.

Загальний вид пластинчастого теплообмінника представлений на рис. 3.2.

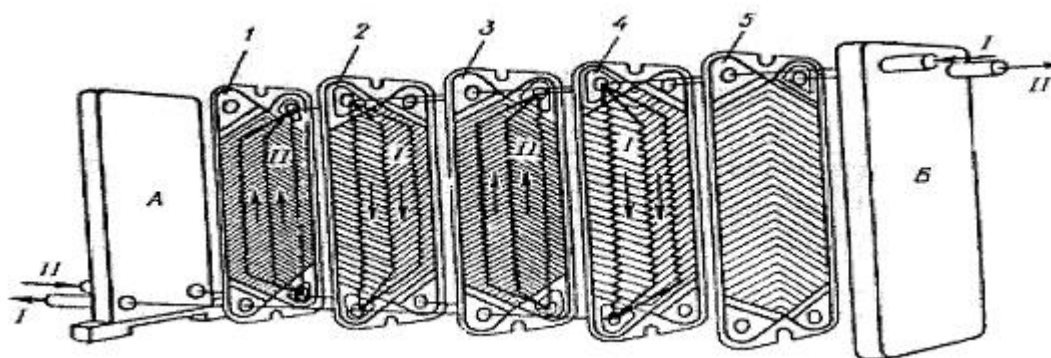


Рисунок 3.2 – Принципова схема пластинчастого теплообмінника: 1, 3, 5 – непарні пластини; 2, 4 – парні пластини; I – вхід і вихід молока; II – вхід і вихід води

Поверхня теплообміну пластинчастого теплообмінника складається з гофрованих пластин із чотирма отворами по кутах. Проклавши між пластинами 2 і 3 спеціальні фасонні прокладки й притискаючи пластини один до одного, можна утворити канал синусоїдального профілю, по якому рідина може перетікати з верхнього лівого отвору в нижнє ліве. Ці два отвори об'єднані загальною великою прокладкою, у той час як два інших отвори оточені малими (кільцевими) прокладками, і з них рідина не може не виходити, не входить в канал. Якщо до двох стислих пластин 2 і 5 притиснути пластину 4, з'єднавши прокладкою нижній правий отвір з верхнім правим, то буде утворено два канали. У першому, між пластинами 2 і 5, один теплоносій перетікає зверху вниз, а в другому каналі, між пластинами 3 і 4, інший теплоносій проходить знизу вверх. Продовжуючи додавати пластини й прокладки праворуч і ліворуч від утвореного пакета, можна збільшувати число паралельних каналів і поверхню теплообміну. Стиснення пакета пластин здійснюється натискними пристроями. Необхідна величина стиснення встановлюється затягуванням гайок до співпадання риски на тягу нульової риски на розпірку. Пластинчасті теплообмінники, з малим об'ємом, мають велику (до $1\ 500\ \text{м}^2/\text{м}^3$) поверхню теплообміну й більших значень

коефіцієнта теплопередачі, до 3800 Вт/м². Поверхня теплообміну може легко змінюватися, тому що залежить від числа пластин. Пластини для теплообмінника – основний його елемент. Пластини виготовляються на потужних пресах методом холодного штампування. Прокладки для пластин вулканізуються в прессформах при високій температурі і під високим тиском.

Передня пластина теплообмінника стикається гофрами з передньою нерухомою стяжною плитою. Конфігурація її прокладки пропускає середовище до інших пластин, не даючи можливість середовищам контактувати з поверхнею плити, створюючи між нею й пластиною повітряний прошарок.

Робоча пластина через себе здійснює процес теплообміну між середовищами, не даючи їм змішуватися один з одним.

Глуха пластина стикається гофрами із задньою рухливою плитою в одноходових теплообмінниках, створюючи повітряний прошарок.

Теплообмінники працюють при тиску від 0,002 до 1,6 МПа (від 0,02 до 16 кгс/см²) і температурі робочого середовища від -20 °С до +150 °С.

Матеріал теплопередаючих пластин: 12X18H10T, 10X17H13M2T, 06XH28МДТ, 08X18H10, титан (при роботі із солонуватою водою), також можна використати нержавіючу сталь вищої якості марок AISI 304-L, AISI-316L, AISI-316Ti, AISI-321L.

Прокладки теплообмінника дозволяють між пластинами чергувати робоче середовище, не даючи їм змішуватися між собою.

Ущільнювальні прокладки спроектовані таким чином, що забезпечують подвійне ущільнення між отворами. Це охороняє рідини від змішування. Течі, пов'язані з відхиленнями в технологічному процесі (наприклад, при гідравлічних ударах) приводять до заповнення рідиною мертвого простору, утвореного подвійним ущільненням, з наступним витіканням її назовні через дренажні канали, роблячи тим самим витік видимим.

Прокладки легко монтуються на пластину клейовим або безклейовим способом за допомогою спеціальних затисків. При стягуванні пластин у пакет прокладки самофіксуються й надійно утримуються в прокладочних канавках, витримуючи тиск до 25 кгс/см². Прокладки виготовляються з різних еластомірів залежно від типу рідин, що беруть участь у теплообміні. Матеріал ущільнювальних прокладок: гумові суміші на основі бутадієн-стирольних, нітрільних, фторированих і етиленпропілендієнових каучуків.

3.2 Оптимізація режиму охолодження й нагрівання теплоносія

Основними показниками ефективності теплового насоса є коефіцієнт перетворення тепла K_T і коефіцієнт перетворення холоду K_X .

Об'єкту, що нагріває, віддається теплота з навколишнього середовища q_2 і теплота, еквівалентна витраченій роботі компресора N :

$$q_1 = q_2 + N, \quad (3.1)$$

$$K_T \times N = K_X \times N + N \quad (3.2)$$

Розділивши обидві частини рівняння на N , отримаємо:

$$K_T = K_X + 1. \quad (3.3)$$

Тепловий насос працює по зворотному циклу Карно [21] рис. 3.3:

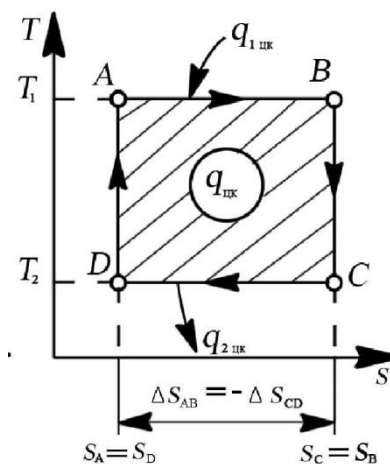


Рисунок 3.3 – Цикл Карно

Прямий цикл Карно протікає по годинній стрілці, зворотний цикл Карно протікає проти годинникової стрілки.

Ідеальні значення коефіцієнтів визначаються по зворотному термодинамічному циклі Карно за наступними формулами (3.4) і (3.5):

Коефіцієнт перетворення тепла:

$$K_T = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \quad (3.4)$$

де T_1 – температура конденсації холодоагенту (температура споживача теплоти), К;

T_2 – температура випаровування холодоагенту (температура джерела низькопотенціальної енергії), К.

Коефіцієнт перетворення холоду:

$$K_X = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \quad (3.5)$$

Щоб перейти до ідеальних коефіцієнтів до реальних вводиться коефіцієнт термодинамічного удосконалення h [22], величина якого для кожного теплового насоса визначається експериментально.

$$h = \frac{K_T^e}{K_T^T}, \quad (3.6)$$

де K_T^e – експериментально знайдений тепловий коефіцієнт; K_T^T – теоретично знайдений тепловий коефіцієнт.

Ступінь термодинамічної досконалості теплонасосних систем залежить від багатьох параметрів: потужності компресора, якості виробництва комплектуючого теплового насоса й необоротних енергетичних втрат. Ці втрати містять у собі втрати теплової енергії в з'єднаних трубопроводах, на подолання тертя в компресорі, втрати, пов'язані з неідеальністю теплових процесів, що протікають у випарнику й конденсаторі, з неідеальністю теплофізичних характеристик хладонів, механічні й електричні втрати у двигунах.

У табл. 3.1 представлені "середні" значення ступеня термодинамічної досконалості h для деяких типів компресорів, використовуваних у сучасних теплонасосних системах теплопостачання [22].

Таблиця 3.1

Ефективність деяких типів компресорів, що використовуються у сучасних теплонасосних системах

№	Тип компресора	Потужність, кВт	Ступінь термодинамічного удосконалення h , частка од.
1	Відкритий відцентровий	300-3000	0,55-0,75
2	Відкритий поршгнвий	50-500	0,5-0,65
3	Напівгерметичний	20-50	0,45-0,55
4	Герметичний, з R-22	2-25	0,35-0,5
5	Герметичний, з R-12	0,5-3,0	0,2-0,35

Формули (3.1) і (3.3) показують – чим менша різниця температур між джерелом і приймачем тепла, тим вищі опалювальний і холодний коефіцієнти. Тому, оптимальними будуть режими роботи теплового насосу при невеликій різниці температур між джерелом і споживачем тепла.

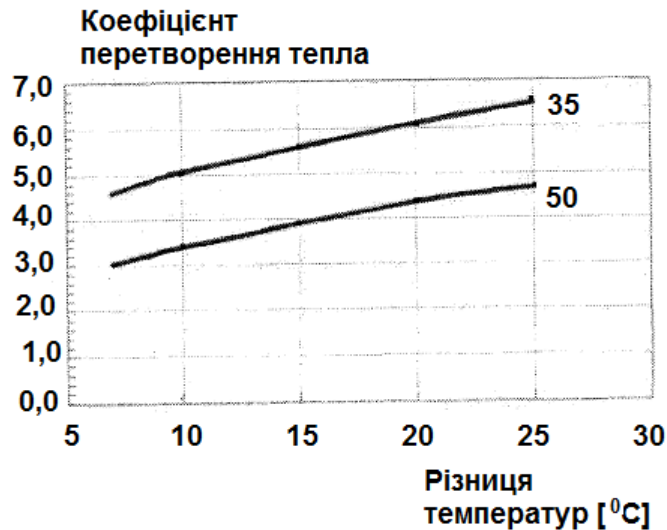


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта перетворення тепла від різниці температур низькопотенціального джерела тепла і високопотенціального споживача тепла.

Графік побудований на підставі розрахунків по формулі (3.4). Верхній графік (рис. 3.4) відноситься до режиму роботи теплового насоса при нагріванні споживача тепла до 35°C, нижній графік – при нагріванні споживача тепла до 50°C. При першому режимі виходять більше високі коефіцієнти, тому що різниця температур між температурами джерела й споживача тепла невелика. Коефіцієнт перетворення тепла зростає зі збільшенням температури джерела енергії.

Дані розрахунку теплового й холодильного коефіцієнтів за формулами (3.4) і (3.5) з урахуванням ступеня термодинамічної досконалості наведені в табл. 3.2

Таблиця 3.2

Коефіцієнти перетворення тепла й холоду

№	T1, К	T2, К	K _T	K _X	Δt, °C	t2/t1
1	313	278	4,9	3,9	35	0,13
2	313	283	5,7	4,7	30	0,25
3	313	388	6,9	5,9	25	0,38
4	313	293	8,6	7,6	20	0,5
5	313	295	9,6	8,6	18	0,55
6	313	298	11,5	10,5	15	0,63

Для економії ресурсів й одержання максимальних коефіцієнтів перетворення тепла й холоду потрібна оптимізація режимів роботи теплових насосів в обмеженому діапазоні робочих температур для одержання економії енергоресурсів.

3.3. Оптимізація параметрів теплопередачі установки

Застосування теплових насосів – один з найбільш динамічно розвиваючихся напрямків високоефективного використання поновлюваних джерел енергії.

Основні переваги теплового насоса перед іншими видами теплопостачання; висока економічність, функції нагрівання й охолодження одночасно.

Для збільшення ефективності роботи теплового насоса необхідно використати метод оптимізації, розроблений з використанням золотого перетину.

Золотий перетин являє собою один з найбільш яскравих проявів гармонії природи. Були виявлені пропорції золотого перетину в різних галузях науки й техніки. Найбільш перспективною в плані пошуку золотого перетину є термодинаміка, що характеризується максимальною фундаментальністю й гармонійністю.

Золотий перетин виникає як результат вирішення завдання про розподіл цілого на дві рівні частини так, щоб відношення меншої частини до більшого рівнялося б відношенню більшої частини до цілого.

$$\varphi = \frac{a}{b} = \frac{b}{a+b} = 0.618, \quad (3.7)$$

де a – менша частина числа;

b – більша частина числа.

Із злотим перетином пов'язаний числовий ряд Фібоначчі:

$$1, 1, 2, 2, 5, 8, 13, 21, \dots \quad (3.8)$$

Відношення кожного члена ряду Фібоначчі до наступного за ним члена дорівнює золотому перетину $\varphi=0,618$.

Золотий перетин являє собою двоякий об'єкт. Двоякий об'єкт – це система, що складається із двох нерівних і нерозривно пов'язаних частин, що взаємно доповнюють і визначають один одного. Двоякість – це наявність двох структур в одному об'єкті. Воно є потужним інструментом дослідження різних систем [23].

Тепловий насос є двояким об'єктом, тому що він може використовуватись одночасно для нагрівання і охолодження [18].

На рис. 3.5 представлена схема роботи теплового насоса.

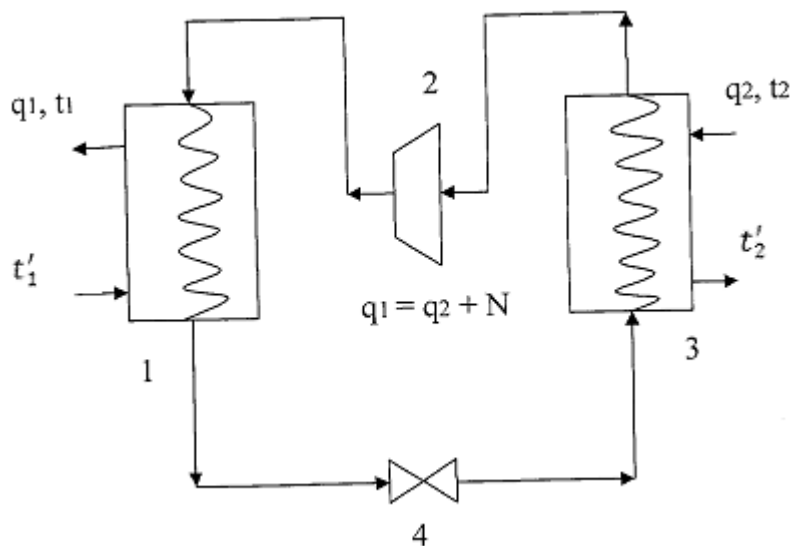


Рисунок 3.5 – Схема роботи теплового насоса: 1 – конденсатор, 2 – компресор; 3 – випарник; 4 – дросель.

Тепловий потік, що відбирає у низькопотенціального джерела тепло (холодовиробник теплового насосу):

$$q_2 = G_2 \times C_2 \times (t_2 - t'_2) \quad (3.9)$$

де G_2 – витрати джерела тепла; C_2 – теплоємність джерела тепла.

Тепловий потік, що отримує споживач тепло (холодовиробник теплового насосу):

$$q_1 = G_1 \times C_1 \times (t_1 - t'_1) \quad (3.10)$$

де G_1 – витрата теплоносія;

C_1 – теплоємність теплоносія.

Нагріваному об'єкту віддається теплота із навколишнього середовища q_2 і теплота, еквівалентна витраченій роботі компресора N :

$$q_1 = q_2 + N \quad (3.11)$$

Надлишкова потужність компресора теплового насосу:

$$N = q_1 - q_2 \quad (3.12)$$

Витрата джерела низькопотенціального тепла на основі досліджених даних повинен бути в 3-4 рази більший витрати теплоносія: $G_1 = 4G_2$.

Якщо в якості джерела низькопотенціального тепла використовувати ґрунтову воду або воду водойми і теплоносієм також буде вода, тоді $C_1 = C_2$

$$N = G_1 \times C_1 \times (t_1 - t'_1) - G_2 \times C_2 \times (t_2 - t'_2) \quad (3.13)$$

Основним показником ефективності теплового насосу є коефіцієнт перетворення тепла K_T і коефіцієнт перетворення холоду K_X .

Формула, що пов'язує два коефіцієнти перетворення тепла і холоду для теплового насосу:

$$K_T = K_X + 1 \quad (3.14)$$

Загальний коефіцієнт перетворення теплового насосу буде рівний сумі двох коефіцієнтів:

$$K = K_T + K_X \quad (3.15)$$

Із значень загальних коефіцієнтів перетворення теплового насосу складемо ряд:

$$1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, \dots \quad (3.16)$$

Можна замітити, що початок цього ряду до цифри 13 наближується до ряду Фібоначчі (2), тобто прямує до золотого перетину.

На рис. 3.6. побудований графік, що показує можливі значення загальних коефіцієнтів перетворення теплового насосу – від 3 до 13. Коефіцієнти перетворення тепла при цьому будуть від 2 до 7, а коефіцієнти перетворення холоду від 1 до 6.

На графіку по осі абсцис відкладені номери членів ряду, а по осі ординат значення членів ряду. Графік Фібоначчі за формою нагадує параболу, графік загальних коефіцієнтів перетворення теплового насоса – пряма лінія. Графіки перетинаються в точці з ординатою 13. До точки 13 графіки наближаються один до одного, а після точки 13 – розходяться. Тому що ряд Фібоначчі відбиває принцип золотого перетину і є мірою гармонії й фундаментальності, він показує, у яких межах можливі значення загальних коефіцієнтів перетворення тепла й холоду теплового насоса – від 3 до 13.

Ідеальні значення коефіцієнтів визначаються по зворотному термодинамічному циклі Карно за формулами (3.4) і (3.5).

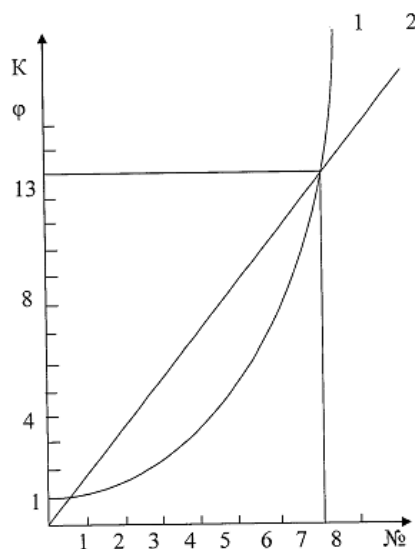


Рисунок 3.6 – Графічна ілюстрація області можливих значень загальних коефіцієнтів перетворення теплового насоса: 1 – ряд Фібоначчі; 2 – ряд загальних коефіцієнтів перетворення теплового насоса

Щоб перейти від ідеальних коефіцієнтів до реального вводиться ступінь термодинамічної досконалості h , величина якої визначається експериментально.

Ступінь термодинамічної досконалості теплонасосних систем $h = 0,55$ [23, 24] залежить від багатьох параметрів: потужності компресора, якості виробництва комплектуючого теплового насоса й необоротних енергетичних втрат. Ці втрати містять у собі втрати теплової енергії в зеднувальних трубопроводах, на подолання тертя в компресорі, втрати, пов'язані з неідеальністю теплових процесів, що протікають у випарнику й конденсаторі, з неідеальністю теплофізичних характеристик хладонів, механічні й електричні втрати у двигунах.

Формули (3.4) і (3.5) показують – чим менша різниця температур між джерелом і приймачем тепла, тим вищі коефіцієнти перетворення тепла й холоду. Тому оптимальними будуть режими роботи теплового насоса при невеликій різниці температур між джерелом і споживачем тепла.

3.4. Залежність умов теплообміну від часу й температури

Передача теплоти здійснюється переміщенням у просторі нерівномірно нагрітих об'ємів рідини. Теплообмін між рідинами (рідиною й стінкою) називають тепловіддачею. Відповідно до закону Ньютона-Ріхмана тепловий потік Q від стінки до рідини пропорційний поверхні теплообміну до різниці між температурою твердої стінки t_c і температурою рідини t_p

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_p - t_c) \cdot \tau \quad (3.17)$$

Як видно із даного рівняння тепловий потік, а відповідно, теплообмін залежить від різниці температур між рідинами (стінкою і рідиною).

На основі процесу переносу теплоти при русі рідини вздовж твердої поверхні наведено рівняння, що описує процес теплопередачі на границях тіла. Так як на поверхні твердого тіла є шар малорухомої дідини, то для нього можна використати закон Фур'є. Приймаючи, що вісь Oy направлена перпендикулярно поверхні, запишемо [25]:

$$q = -\lambda \cdot \left[\frac{\partial t}{\partial y} \right]_{y=0} \cdot \tau \quad (3.18)$$

$$q = \alpha \cdot (t_p - t_c) \cdot \tau$$

Однак

α – коефіцієнт тепловіддачі, кДж/(кг·К);

λ – коефіцієнт теплопровідності Вт/(м·К);

τ – тривалість охолодження молока, с;

$\left[\frac{\partial t}{\partial y}\right]_{y=0}$ – зміна температури по товщині пластини, °С.

Прирівнюючи ці рівняння, отримаємо:

$$\alpha = \frac{-\lambda}{(t_p - t_c)} \cdot \left[\frac{\partial t}{\partial y}\right]_{y=0} \quad (3.19)$$

Із даного рівняння видно, що коефіцієнт тепловіддачі залежить не тільки від різниці температур між двома рідинами (рідиною і стінкою), але і від тривалості охолодження молока.

3.5. Технічна реалізація установки охолодження молока і нагріву води

На основі математичної моделі охолодження молока і нагріву води, розроблюємо технічну реалізацію установки. На рис. 3.7. представлений пластинчастий охолоджувач та тепловий насос

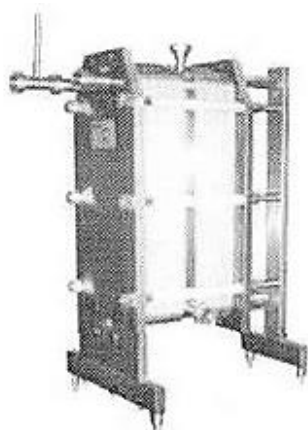


Рисунок 3.7 – Охолоджувач пластинчастий



Рисунок 3.8 – Тепловий насос

Охолоджувач пластинчастий і тепловий насос збираємо відповідно технологічної схеми охолодження молока і нагріву води.

Для виробництва теплообмінних пластин вибираємо сталь 12Х18Н10Т, найбільш відповідним вимогам, що мають відповідні характеристики:

Класифікація Сталь корозійно-стійка звичайна Фізичні властивості матеріалу 12Х18Н10Т.

T, °C	E 10 ⁻⁵ , МПа	a10 ⁶ , 1/°C	λ, Вт/(м·°C)	γ, кг/м ³	C, Дж/(кг·°C)	R 10 ⁹ , Ом·м
20	1,98		15	7900		725
100	1,94	16,6	16		462	792

Фізичні властивості:

T – температура, при якій отримані данні властивості, [°C].

E – модуль пружності першого роду, [МПа].

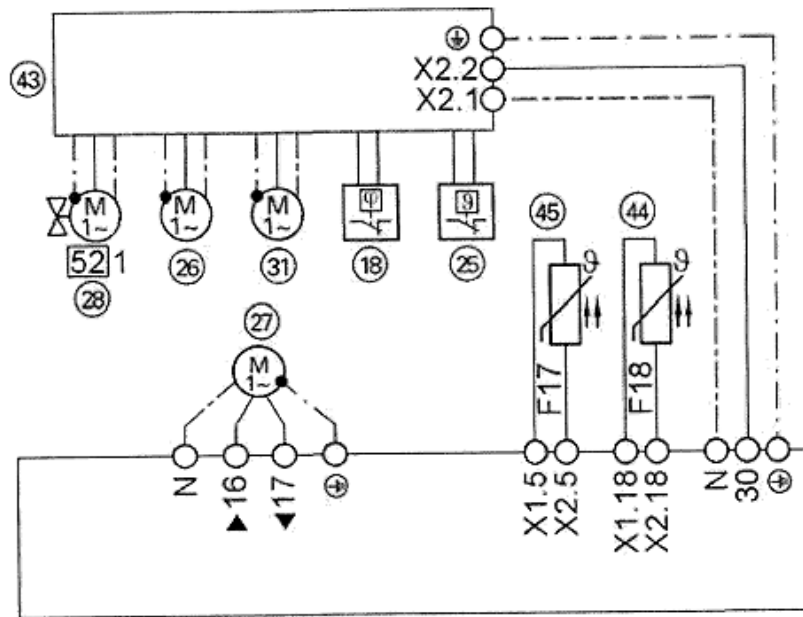


Рисунок 3.10 – Схема підключення теплового насосу

Таблиця 3.3

Позначення позицій на схемах керування

Позиція	Найменування
1	Тепловий насос
18	Начіпний датчик вологості
24	Проточний теплообмінник
25	Реле контролю захисту від замерзання
26	Циркуляційний насос (насос первинного контуру охолодження)
27	3 - ходовий змішувач (первинний контур охолодження)
28	2 - ходовий кульковий клапан з електроприводом
31	Циркуляційний насос (насос вторинного контуру охолодження)
32	Мембранний розширювальний бак
43	Розширювальний комплект охолодження
44	Датчик температури подачі для змішувача
45	Пристрій дистанційного керування з датчиком температури приміщення для контуру
К	Контролер теплового насоса
М	Мотор

Тепловий насос 1 постачає опалювальний контур теплом. Контролером К теплового насоса 1 регулюється температура подачі теплоносія і, тим самим, опалювальний контур. Вторинний насос 2 подає теплоносії через 3-ходовий перемикаючий клапан до ємкостного водонагрівача або до буферної ємкості контуру, що гріє. Циркуляційні насоси опалювальних контурів подають необхідну кількість води в опалювальні й охолоджувальні контури. Витрата в контурах регулюється

відкриттям і закриттям терморегулювальних вентилів або зовнішнім контролером опалювальних контурів. Витрата, використана при розрахунку циркуляційних насосів опалювальних й охолоджувальних контурів, може відрізнятись від витрати в контурі теплового насоса. Для компенсації різниці цих витрат води необхідно встановити паралельно опалювальному й охолоджувальному контурам буферну ємкість. Тепло, не використане контурами, паралельно накопичується у буферній ємкості. Крім того, тим самим досягається рівномірний режим роботи теплового насоса (тривалий час роботи). Коли на нижньому датчику температури буферної ємкості контурів буде досягнута настроєна в контролері задана температура, тепловий насос 1 вимикається. У цьому випадку опалювальний і охолоджувальний контури забезпечуються теплом і холодом від буферних ємкостей. Тільки після того, як температура на верхньому датчику температури буферної ємкості стане нижче заданої температури, знову включається тепловий насос. У періоди відключення подачі електроенергії опалювальний контур забезпечується теплом від буферної ємкості.

Висновки по розділу 3

В даному розділі було проаналізовано основні показники системи охолодження молока (температуру й тиск молока й води: при тиску від 0,002 до 1,6 МПа (від 0,02 до 16 кгс/см²) і температури від -20 °С до +150 °С), у нашому випадку при температурі 4...45°С система може ефективно працювати.

Підібрано матеріал теплообмінних пластин (12X18H10T) і ущільнювальних прокладок (гумові суміші на основі бутадієн-стирольних, нітритних, фторированих і етиленпропілендієнових каучуків), теплоносій R410A;

Зроблено оптимізацію режиму охолодження і нагрівання теплоносія: теплові насоси доцільно використати при різниці температур між джерелом і споживачем тепла не більш, ніж 35...45°С, щоб одержати коефіцієнт перетворення тепла 4...7. Зроблено оптимізацію параметрів теплопередачі установки $K_T = 4...7$; $K_X = 3...6$.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз установок для охолодження молока на тваринницькому комплексі показав, що найбільші енергозатрати приходяться на технологічний процес первинної обробки молока, тобто його охолодження.

2. Розроблені математичні моделі технологічних процесів роботи установки охолодження молока і нагріву води (рис. 3.7-3.10), на основі яких відбувається керування системою охолодження молока і нагріву води.

3. Зроблено оптимізацію режиму охолодження і нагрівання теплоносія: теплові насоси доцільно використати при різниці температур між джерелом і споживачем тепла не більш, ніж 35...45°C.

4. У відповідності з моделлю розроблений метод і критерії оптимізації параметрів охолодження молока і нагріву води вибрані: коефіцієнти перетворення тепла і холоду ($K_T = 4 \dots 7$, $K_X = 3 \dots 6$).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія молока та молочних продуктів : навчальний посібник / Власенко В. В., Головка М. П., Семко Т. В., Головка Т. М. – Харківський державний університет харчування та торгівлі. – Харків : ХДУХТ, 2018. – 202 с.
2. Єресько Г. О. Технологічне обладнання молочних виробництв : навч. посібник / Г. О. Єресько, М. М. Шинкарик, В. Я. Ворощук. – К. : ІНКОС Центр навч. л-ри, 2007. – 344 с.
3. Машкін М. І. Технологія виробництва молока і молочних продуктів : Навчальне видання / М. І. Машкін, Н. М. Париш. – К. : Вища освіта, 2006. – 351 с.
4. Машини та обладнання переробних виробництв: навч. посібник для студ. вузів / О.В. Дацишин [та ін.]; за ред. О.В. Дацишина. – К.: Вища освіта, 2005. – 159 с.
5. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва: навч. посібник / П.С. Берник [та ін.]. – Львів: Вид-во Національного ун-ту "Львівська політехніка", 2004. – 336 с.
6. Єресько, Г.О. Технологічне обладнання молочних виробництв: навч. посіб. для студ. вузів / Г.О. Єресько, М.М. Шинкарик, В.Я. Ворощук. – К.: Фірма «ІНКОС», ЦУЛ, 2007. – 344 с.
7. Теплообмінні процеси та обладнання переробного та харчового виробництва : навчальний посібник / І.П. Паламарчук [та ін.]. – Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2006. – 368 с.
8. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси : навчальний посібник / О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 123 с.
9. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
10. Долинский А. А. Тепловые насосы в теплоснабжении / А. А. Долинский, Е. Т. Базеев, А. И. Чайка // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28, № 2. – С. 99–105.
11. Янтовский Е. И. Парокомпрессионные теплонасосные установки / Е. И. Янтовский, Ю. В. Пустовалов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 144 с.
12. https://dnaop.com/html/34011/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_3662-97
13. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: навч. посіб. / О.В. Гвоздєв, Ф. Ю. Ялпачик, Ю. П. Рогач [та ін.]; за ред. к. т. н. О.В. Гвоздєва. - Суми: Видавництво "Довкілля", 2004. – 420 с.
14. Обухов, П.А. Обработка молока и уход за молочным оборудованием / П.А. Обухов. - М.: Россельхозиздат, 1971. - 166 с.
15. Термодинамические диаграммы i-IgP для хладагентов. М. : АВИСАНКО, 2003. – 50 с.
16. Пісарев В.Є. Теплові насоси та холодильні установки. Навчальний

посібник. – К.: КНУБА, 2002. – 124с.

17. Низькопотенційна енергетика [Текст] : навч. посіб. / А. О. Редько, М. К. Безродний, М. В. Загорученко та ін. ; Нац. техн. ун-т України "Київський політехнічний університет", Одес. нац. акад. харч. технологій, Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури, Вінниц. нац. техн. ун-т. - Харків : Друк. Мадрид, 2016. - 412 с.

18. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навчальний посібник / В. М. Арсеньев, С. С. Мелейчук. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 364 с.

19. Соколов Е. Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. – 2-е изд. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 320 с.

20. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов / Т. В. Морозюк. – Одесса : Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.

21. http://fizmat.by/kursy/termodinamika/teplovye_dvigateli

22. Захаров, А.А. Резервуары - охладители типа РНО / А.А. Захаров, Ю.В. Краснокутский, Х.Г. Урусмамбетов [и др.]. – Холодильная техника, 1982.-С. 18-20.

23. <https://futurenow.com.ua/ru/chto-takoe-chysla-fybonachchy-zolotoe-sechenye/>

24. Шубенко В. О. Використання низькотемпературних джерел енергії та їх перетворювачів / В. О. Шубенко, С. М. Кухарець // Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України / відп. ред. О. В. Скидан. – К. : Центр учбової літератури, 2014. – С. 240–261.

25. <https://moyaosvita.com.ua/fizuka/zakon-furje-osnovnij-zakon-teploprovodnosti/>